第 40 卷 第 3 期
2023 年 6 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 40 No. 3
Jun. 2023

文章编号:1000-4939(2023)03-0724-09

青年大学生跑者下肢关节等速肌力与关节刚度的相关性研究

张勤,陈诗琴,李斐

(上海体育学院竞技运动学院,200438 上海)

摘 要:旨在探究青年大学生跑者下肢关节等速肌力与跑步过程中关节刚度的相关性。招募 34 名男性业余跑者,采用三维动作捕捉系统和测力跑台、等速肌力测试系统测量 10 和 12 km/h 跑速下的膝和踝关节刚度;60°/s 和 180°/s 角速度下的膝和踝关节屈伸肌群峰值力矩(peak torque,PT)。使用经过 Benjamini-Hochberg 法校正后的皮尔逊相关系数分析膝关节等速 PT 与膝关节刚度;以及踝关节等速 PT 与踝关节刚度之间的相关性。结果发现:60°/s 和 180°/s 角速度下的膝关节屈肌向心/离心收缩 PT 与膝关节刚度呈中-高度正相关;60°/s 角速度下的踝关节背屈肌离心收缩 PT 与踝关节刚度呈中-高度正相关;膝关节伸肌和踝关节跖屈肌 PT 与膝和踝关节刚度均不存在显著相关性。据此,具备更强的膝关节屈肌和离心踝背屈肌力量的业余跑者在跑步过程中表现出更大的膝和踝关节刚度。

关键词:等速收缩;刚度;跑步经济性;力量训练

中图分类号:G804.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.025

Correlation between isokinetic lower-limb joint strength and joint stiffness in young college runners

ZHANG Qin, CHEN Shiqin, LI Fei

(School of Athletic Performance, Shanghai University of Sport, 200438 Shanghai, China)

Abstract: This study aimed to investigate the correlation between isokinetic lower-limb joint strength and joint stiffness during running in young college runners. Thirty-four male recreational runners were recruited. The knee/ankle joint stiffness at 10 and 12 km/h, and knee/ankle joint flexors and extensors peak torque (PT) at 60°/s and 180°/s were measured by using a 3D motion capture system and a split-belt instrumented treadmill, and an isokinetic strength test and training system, respectively. Correlations between isokinetic knee joint PT and knee joint stiffness and between isokinetic ankle joint PT and ankle joint stiffness were analyzed using Pearson correlation coefficients corrected by Benjamini-Hochberg. The results are as follows: The knee flexors concentric/eccentric PT at 60°/s and 180°/s were moderately to largely posi-

收稿日期:2022-07-19 **修回日期:**2022-09-30
基金项目:上海市青年科技英才杨帆计划资助项目(No. 20YF1446500)
通信作者:李斐,副教授。E-mail:lifei@sus.edu.cn
引用格式:张勤,陈诗琴,李斐. 青年大学生跑者下肢关节等速肌力与关节刚度的相关性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(3):724-732.
ZHANG Qin, CHEN Shiqin, LI Fei. Correlations between isokinetic lower-limb joint strength and joint stiffness in young college runners[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(3): 724-732.

tively correlated with knee joint stiffness; the ankle dorsiflexors eccentric PT at 60°/s was moderately to largely positively correlated with ankle joint stiffness; the knee extensors and ankle plantar flexors PT were not significantly correlated with knee and ankle joint stiffness. Therefore, recreational runners with greater knee flexors and ankle dorsiflexors eccentric strength exhibit greater knee and ankle joint stiffness during running.

Key words: isokinetic contraction; stiffness; running economy; strength training

“刚度(stiffness)”最初起源于“虎克定律”(Hook’s Law),被定义为外力与其施加在弹簧系统上形变位移之间的比例,反映了系统弹性性能和积累弹性势能的能力[1-2]。跑步中,更高的下肢刚度有利于弹性能量的贮存与释放,从而有利于跑步经济性的提升[2]。跑步是一种下肢多关节协调的弹跳运动[3]。由于关节周围肌肉、肌腱等组织在负荷条件下的拉长-缩短循环(stretch and shortening cycle, SSC)现象被描述为具有“弹簧式”行为[2,4],故在“刚度”的基础上衍生出“关节刚度”的概念。关节刚度定义为关节扭转形变力矩与形变角位移的比率,反映了关节层面弹性能量的利用能力[1]。之前关于下肢关节刚度的比较研究发现,相比业余选手,高水平跑者拥有更高的膝、踝关节刚度及下肢刚度[5]。而膝和踝关节刚度被认为是下肢刚度大小的决定因素[1,5],因而更高的膝、踝关节刚度理论上能够增加跑步中弹性能的利用效率,转化为更为经济的跑步。因此,探究膝、踝关节刚度的影响因素对于提高跑步经济性具有重要的理论及应用价值。

在跑步触地阶段,膝、踝关节周围肌群协同收缩以调节关节刚度的大小[6]。与此同时,膝和踝关节肌群收缩产生高张力为跑步提供动力[7-8]。例如:膝关节伸肌在触地前期发挥支撑和减速身体质心向前的作用[7],并促使膝关节屈肌(如:腘绳肌)在触地后期产生前进的驱动力[8]。同时踝关节跖屈肌也被迅速激活,最高可产生超过自身体重 12 倍的肌肉张力[9],是推动身体质心前进的主要肌群[7]。此外,膝关节伸肌(如:股外侧肌)和踝关节跖屈肌(如:内侧腓肠肌)在跑步支撑阶段进行准等长的收缩形式(quasi-isometric contraction)促使了肌肉-肌腱复合体(muscle-tendon unit, MTU)刚度增加,进一步提高了髌腱或跟腱在跑步中的 SCC 效率,从而促进弹性能量在关节层面的有效利用[8]。由上述可见,关节肌肉力量可能是调节关节刚度的重要影响因素。

目前关于肌肉力量与刚度的相关性研究集中于肌腱刚度层面。HOLZER 等[10]报道老年人踝关节跖屈肌力量与跟腱刚度呈显著正相关关系($r = 0.5$)。KUBO 等[11]发现未经训练跑者的膝关节伸肌力量和髌腱刚度呈显著正向相关,但在高训练水平跑者中并未发现此相关关系。关节刚度受到肌肉、肌腱以及其他软组织的共同影响[1],通过静态测得的肌腱刚度无法反映跑步过程中实际的关节刚度变化。因此,关节肌肉力量与实际跑步环境中关节刚度之间的相关性还需进一步研究。

使用三维动作捕捉系统和测力跑台可通过采集运动学和动力学数据直接计算出跑步过程中的关节刚度[3,12],并且能最大程度上减少运动学与动力学测试的误差[13-14]。此外,等速肌力测试是一种安全、精确的实验室测试方法,其输出的峰值力矩(peak torque, PT)是评估关节肌肉力量的黄金标准[15]。一项最新研究报道了下肢关节等速肌力与整体腿刚度存在显著相关关系[16]。然而,尚未有研究报道关节等速肌力与关节刚度之间的相关性。基于此,本研究通过测量业余跑者在跑步过程中的膝、踝关节刚度,探究其与膝、踝关节等速肌力之间的相关性,为进一步理清关节肌肉力量发挥调节关节刚度的作用提供理论依据。

1　研究对象与方法

1.1　实验对象

34 名来自大学跑步社团的男性业余训练跑者自愿加入本研究,所有受试者近 6 个月无明显下肢骨骼肌肉损伤,近 3 个月每周跑量介于 20 ~ 30 km,均采用足跟着地方式跑步以限制足着地方式(foot strike pattern)对关节刚度产生影响。受试者基本信息见表 1。在测试前 24 h 内,要求受试者避免剧烈运动以及至少 8 h 的充足睡眠,确保他们没有任何肌肉酸痛或疲劳。在详细告知所有测试流程,并对实验中可能产生的相关风险进行说明后,所有受试者均签署了知情同意书。

表 1　跑者基本情况 ($\overline{X}-SD$)

Tab. 1　Basic information of the runners ($\overline{X}-SD$)

人数/名	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m⁻²)	脂肪量/kg	去脂体重/kg	最大摄氧量/(ml·kg⁻¹·min⁻¹)
34	21 ± 1	180 ± 6	73.34 ± 9.26	22.48 ± 1.92	11.64 ± 4.00	61.70 ± 6.74	54.38 ± 5.26

1.2　实验方法

1.2.1　运动学与动力学测试

如图 1 所示，采用 8 个摄像头的三维动作捕捉系统(Vicon Metrics Ltd.，Oxford，UK)捕获反光标识点坐标轨迹，用于膝和踝关节矢状面运动学参数的采集，采样频率为 100 Hz[12]，使用三维测力跑台(Bertec FIT，USA)采集垂直地面反作用力(vertical ground reaction force，vGRF)数据，采样频率为 1 000 Hz[12]。

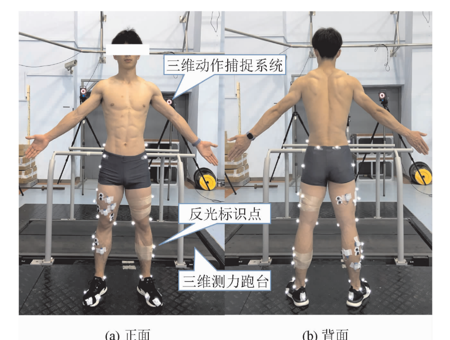


图 1　反光标识点位置及场地布置

Fig. 1　Placement of reflective markers and experimental site

受试者首先以 8 km/h 的速度热身 4 min，随后要求受试者以 10 和 12 km/h 的恒定跑速进行测试，从而避免跑步速度对关节刚度产生影响。每个速度下各跑 4 min，两个跑速之间间歇 1 min，收集每个速度最后 1 min 的 10 个完整步态进行数据处理[17]。

1.2.2　等速肌力测试

采用德国 IsoMed2000 等速力量测试与训练系统测试右下肢膝和踝关节屈伸肌群的向心和离心收缩 PT，膝关节屈伸测试采取坐位，踝关节屈伸测试采取仰卧位(图 2)。测试速度包括慢速(60°/s)和快速(180°/s)，60°/s 的 PT 用于评估跑者膝、踝关节最大力量[15,18]，180°/s 的 PT 用于评估膝、踝关节快速力量[18-19]。测试前，对下肢进行称重，去除下肢重力对力量产生的干扰[20]。受试者需进行 3 次次最大力量练习以熟悉向心和离心动作模式。正式开始后，膝和踝关节屈伸肌群向心和离心收缩各重复 5 次，两种动作模式测试之间间歇 1 min，膝和踝关节测试之间间歇为 10 min。另外，测试人员给予受试者极大的鼓励以使其最大努力发力。







图 2　等速力量测试与训练系统

Fig. 2　Isokinetic strength test and training system

1.3　数据处理与分析

采用 V3D 步态分析软件通过 Butterworth 四阶低通滤波对矢状面运动学数据进行滤波，截止频率为 7 Hz[21]。膝和踝关节运动学参数包括：1) 触地时刻角度；2) 支撑中期最大屈曲时刻角度。动力学参数通过逆向动力学获得。动力学参数包括：1) vGRF；2) 关节触地时刻力矩；3) 支撑中期关节最大屈曲时刻力矩。vGRF > 50 N 作为触地开始的阈值[6,12]。关节刚度(K)定义为足触地时刻至关节最大屈曲时刻关节力矩差值(ΔM)与关节角位移($\Delta\theta$)间的比值[12,22]，用单位 Nm/°表示，计算公式为

$$K = \frac{\Delta M}{\Delta \theta}$$

其中:膝关节刚度(Nm/°)为触地时刻至膝关节最大屈曲时刻膝关节力矩差值与膝关节角位移的比值,即图 3(a)中红色拟合虚线的斜率;踝关节刚度(Nm/°)为触地时刻至踝关节最大背屈时刻踝关节力矩差值与踝关节角位移的比值,即图 3(b)中红色拟合虚线的斜率。

另外,膝、踝关节等速肌力参数取 5 次重复的最大 PT(图 4)。参数包括:1)60°/s 和 180°/s 角速度下膝关节屈伸肌群向心收缩 PT;2)60°/s 和 180°/s 角速度下膝关节屈伸肌群离心收缩 PT;3)60°/s 和 180°/s 角速度下踝关节背屈、跖屈肌群向心收缩 PT;4)60°/s 和 180°/s 角速度下踝关节背屈、跖屈肌群离心收缩 PT。

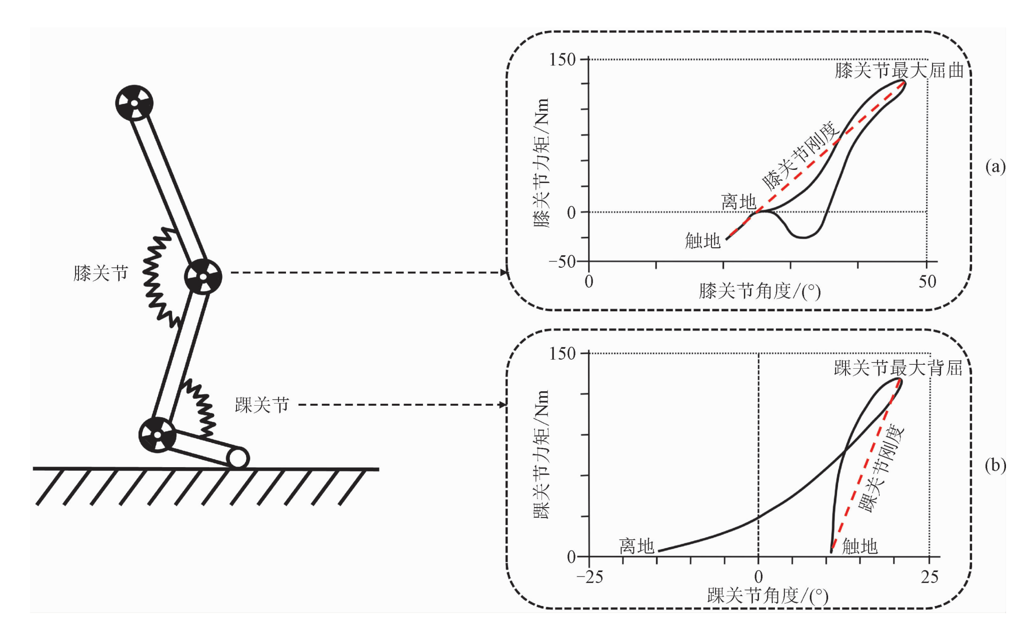


图 3　关节刚度计算示意图

Fig. 3　Calculation diagram of joint stiffness

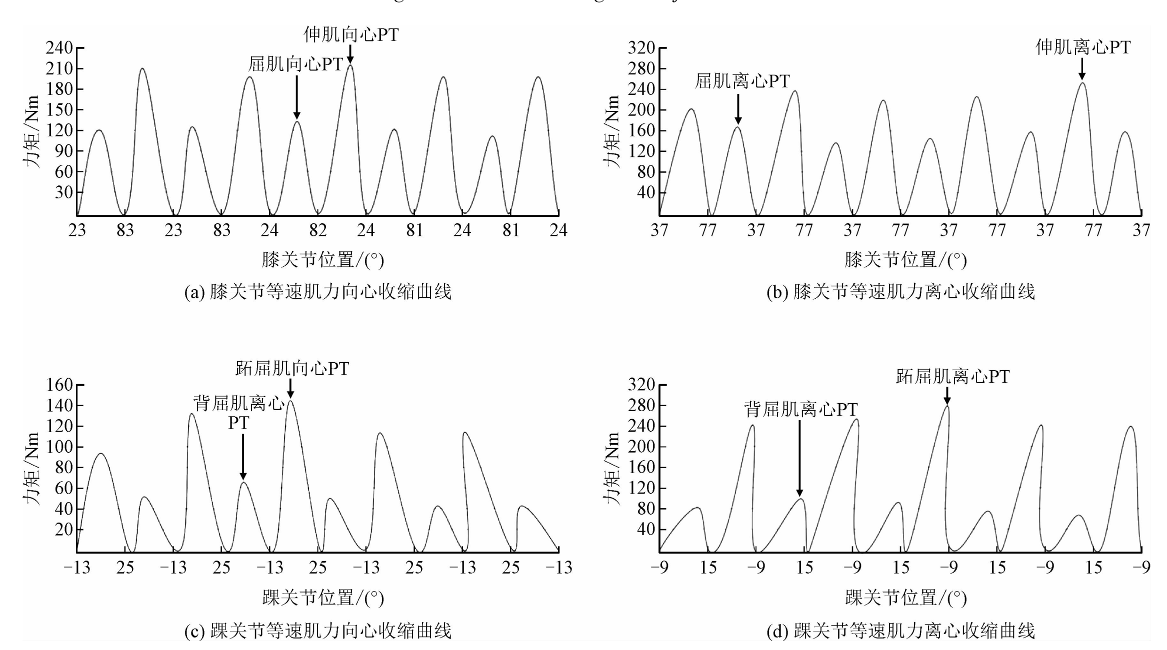


图 4　膝、踝关节等速肌力曲线

Fig. 4　Isokinetic muscles strength curve of knee and ankle joints

1.4　统计分析

应用 SPSS22.0 软件处理数据，采用 Shapiro-Wilk 进行正态性检验，所得参数均使用平均数-标准差（$\bar{X}-SD$）表示。皮尔逊相关系数 r 为“0.1～0.3”“0.3～0.5”“0.5～0.7”“0.7～0.9”和“0.9～1.0”分别代表低、中、高、很高和极高的相关关系[23]，采用 BH（Benjamini-Hochberg）法校正 P 值，以降低多重比较增加的错误发现率[24]，使用配对样本 t 检验比较受试者膝和踝关节刚度之间的差异，$P<0.05$ 为具有统计学意义。

2　结　果

2.1　膝关节等速肌力与膝关节刚度相关性

本研究发现，受试者 60°/s 和 180°/s 角速度下的膝关节屈肌向心/离心收缩 PT 与 10 和 12 km/h 的膝关节刚度呈中-高度正向相关（$r=0.396\sim0.614$，$P<0.05$）。在膝关节伸肌力量方面，膝关节伸肌 PT 与膝关节刚度无统计学意义（表 2）。

表 2　膝关节等速肌力与膝关节刚度的相关性（$n=34$）

Tab. 2　Correlation between isokinetic knee joint muscle strength and knee joint stiffness（$n=34$）

指标	$\bar{X}-SD$	10 km/h 膝刚度		12 km/h 膝刚度	
		r	P(校正)	r	P(校正)
60°/s 膝屈-向心/Nm	130.91 ±20.50	0.417	0.037 *	0.404	0.040 *
60°/s 膝伸-向心/Nm	236.88 ±44.38	0.256	0.177	0.238	0.200
60°/s 膝屈-离心/Nm	148.12 ±29.24	0.614	0.000 **	0.592	0.000 **
60°/s 膝伸-离心/Nm	265.82 ±65.40	0.307	0.113	0.295	0.120
180°/s 膝屈-向心/Nm	117.41 ±18.82	0.440	0.029 *	0.396	0.040 *
180°/s 膝伸-向心/Nm	182.24 ±32.67	0.364	0.054	0.365	0.054
180°/s 膝屈-离心/Nm	145.38 ±28.91	0.582	0.000 **	0.558	0.004 *
180°/s 膝伸-离心/Nm	253.53 ±61.08	0.150	0.397	0.174	0.346

注：* 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.001$；膝屈-向心、膝伸-向心分别表示膝关节屈、伸肌群向心收缩峰值力矩；膝屈-离心、膝伸-离心分别表示膝关节屈、伸肌群离心收缩峰值力矩。

2.2　踝关节等速肌力与踝关节刚度相关性

踝关节上，受试者 60°/s 角速度下的踝关节背屈肌离心收缩 PT 与 10 和 12 km/h 的踝关节刚度呈中-高度正相关（$r=0.460\sim0.523$，$P<0.05$），然而，踝关节跖屈肌 PT 与踝关节刚度无统计学意义（表 3）。

表 3　踝关节等速肌力与踝关节刚度的相关性（$n=34$）

Tab. 3　Correlation between isokinetic ankle joint muscle strength and ankle joint stiffness（$n=34$）

指标	$\bar{X}-SD$	10 km/h 踝刚度		12 km/h 踝刚度	
		r	P(校正)	r	P(校正)
60°/s 踝背屈-向心/Nm	36.26 ±6.90	0.265	0.308	0.215	0.353
60°/s 踝跖屈-向心/Nm	127.12 ±22.65	0.126	0.544	0.261	0.308
60°/s 踝背屈-离心/Nm	58.00 ±8.64	0.460	0.048 *	0.523	0.016 *
60°/s 踝跖屈-离心/Nm	218.26 ±46.85	0.239	0.308	0.265	0.308
180°/s 踝背屈-向心/Nm	26.50 ±5.06	0.197	0.353	0.093	0.642
180°/s 踝跖屈-向心/Nm	86.56 ±18.79	0.057	0.747	0.174	0.400
180°/s 踝背屈-离心/Nm	57.97 ±10.15	0.268	0.308	0.413	0.080
180°/s 踝跖屈-离心/Nm	216.53 ±53.61	0.201	0.353	0.245	0.308

注：* 表示 $P<0.05$；踝背屈-向心、踝跖屈-向心分别表示踝关节背屈、跖屈肌群向心收缩峰值力矩；踝背屈-离心、踝跖屈-离心分别表示踝关节背屈、跖屈肌群离心收缩峰值力矩。

2.3　膝和踝关节刚度值比较

膝和踝关节刚度值受到足着地方式的影响[2,22]。本研究测得在 10 和 12 km/h 跑速下的膝关节刚度分别为(5.70 ± 4.74) Nm/° 和(6.13 ± 6.59) Nm/°,10 和 12 km/h 跑速下的踝关节刚度分别为(16.44 ± 8.55) Nm/° 和(12.92 ± 5.04) Nm/°。使用配对样本 t 检验比较受试者的膝和踝关节刚度值发现:两个跑速下的膝关节刚度均显著低于踝关节刚度($P < 0.001$)。

3　分析与讨论

更高的下肢整体刚度(如:腿刚度)有利于机体在触地阶段贮存更多的弹性能量,从而降低跑步中生物能量的消耗[1-2]。跑步是一种下肢多关节协调的弹跳运动[3],膝和踝关节刚度是调节腿刚度的主要贡献者[1,5]。本研究测得的膝和踝关节刚度数值(膝:5.70 ~ 6.13 Nm/°;踝:12.92 ~ 16.44 Nm/°)与前人的研究相一致[22]。在关节肌肉力量与刚度相关性方面,本研究首先发现受试者 60°/s 和 180°/s 的膝关节屈肌向心/离心收缩 PT 与膝关节刚度呈中-高度正相关关系。虽然目前尚未有研究直接报道膝关节力量与膝关节刚度的相关性,但 CHEN 等[16]指出 60°/s 的膝关节屈肌 PT 与腿刚度(leg stiffness)和垂直刚度(vertical stiffness)存在显著相关关系,进一步支持了本研究结果。膝关节屈肌在跑步不同阶段发挥着调节膝关节刚度的作用。例如:在摆动阶段后期,膝关节屈肌(如:腘绳肌)进行离心收缩以限制小腿向前摆动,减少腾空时间,从而保持较小的步幅[25-27]。步幅缩短则会减小膝关节屈曲角位移,进而产生更高的膝关节刚度[28]。VERHEUL 等[29]的研究表明跑者在摆动阶段后期更早地屈曲膝关节能够在触地早期产生更大的膝关节刚度。LESKINEN 等[30]的研究也发现在触地阶段,精英跑者拥有较小的膝关节屈曲角位移有利于提高弹性能量的利用效率。由此可见,更大的膝关节屈肌离心力量可能通过优化步幅增高膝关节刚度,从而提升跑步经济性。GÓMEZ-MOLINA 等[31]指出在一致的跑步速度和足跟着地方式下,较短的步幅和较高的步频是长期耐力训练的结果,该步态对跑步经济性的提升也产生积极效果。另一方面,腘绳肌在触地阶段向心收缩以协助髋关节伸展,同时提供充足动力推动身体质心越过支撑脚[26]。HAYES 等[26]的研究报道,更好产生髋关节伸展所需张力的跑者表现出更加稳定的步幅。此外,腘绳肌与股四头肌在触地阶段协同收缩为膝关节提供稳定性[27,32]。HAGOOD 等[32]发现在下肢快速运动中,腘绳肌对膝关节稳定性和刚度的贡献显著高于股四头肌。因此,腘绳肌协助髋关节伸展和发挥稳定膝关节的作用可能是膝关节屈肌向心 PT 与膝关节刚度相关的原因。

踝关节背屈肌(如:胫骨前肌)在跑步步态周期中的一个关键作用是促使脚趾在触地末期迅速离地,并在摆动阶段加速踝关节背屈[33]。而足跟着地时更大的踝背屈角度能够通过降低踝关节角位移(踝关节从触地至最大背屈的角度变化量)来增加踝关节刚度[22,34]。本研究发现,受试者 60°/s 角速度下踝背屈肌离心收缩 PT 与踝关节刚度显著正相关,表明拥有更强踝背屈肌离心最大力量的跑者具备较高的踝关节刚度。跑步中脚趾离开地面之前,踝背屈肌被动拉长产生张力,同时肌腱组织(腱膜)拉长贮存弹性能量,为随后摆动阶段加速踝关节进入背屈位创造了条件[33,35]。虽然本研究未测试相关肌电指标,但之前的研究报道更强壮的运动员表现出更大程度的肌肉激活[36-37],其中踝关节背屈肌主要由快肌纤维组成[38],因而在离心收缩条件下较其它肌群更容易达到完全激活[39]。因此,更强壮的跑者可能在脚趾离开地面之前促使踝背屈肌高度激活产生高张力,将弹性能量贮存在进一步拉长的肌腱组织中,从而使踝关节在摆动阶段更快背屈[33],最终增加触地阶段的踝关节刚度。目前研究关于踝关节背屈肌力量与踝关节刚度的直接证据有限,未来需要进一步探究跑步中踝背屈肌力量对于踝关节刚度及跑步表现的影响。

除膝关节屈肌和踝关节背屈肌群外,膝关节伸肌和踝关节跖屈肌力量与关节层面弹性能量的利用效率直接相关[8]。触地前期,膝关节伸肌迅速激活产生高张力以保持股四头肌准等长收缩,从而将落地产生的冲击能量储存在拉长的髌腱中,并在触地后期释放。踝关节跖屈肌也执行准等长的收缩形式,在产生高肌肉张力的同时优化弹性能量在跟腱

中的储存与利用效率[8]。另外,膝关节伸肌和踝关节跖屈肌是跑步触地阶段支撑和驱动身体质心前进的主要肌群,同时贡献了大部分的峰值 vGRF[7]。CHEN 等[16]的研究指出,由"峰值 vGRF 与腿或身体质心垂直位移的比值"计算得出的腿刚度或垂直刚度与膝关节伸肌和踝关节跖屈肌 PT 显著相关。然而,本研究结果没有显示膝关节伸肌、踝关节跖屈肌 PT 与膝、踝关节刚度之间存在任何显著相关性。与腿刚度或垂直刚度不同,关节刚度由关节扭转形变力矩和形变角位移的比值计算得出,受到肌肉激活程度、关节角度、关节活动范围和角速度等多重影响[4]。尽管等速肌力测试与跑步中关节运动模式类似(均在一定角速度下产生扭转力矩),但两种测试方法的肌肉收缩形式不同。跑步中,膝关节伸肌和踝关节跖屈肌执行准等长的收缩形式,而在等速肌力测试中肌肉执行向心或离心收缩,肌腱无法实现快速拉长与回缩,因而弹性能量在肌腱的贮存无法实现[40]。因此,肌肉收缩形式的差异可能是膝关节伸肌和踝关节跖屈肌等速肌力与关节刚度不显著相关的原因。

值得注意的是,膝和踝关节刚度的大小受到足着地方式的影响,因而在探究下肢关节刚度在跑步中发挥的作用时,必须考虑受试者的惯用足着地方式,以判断本研究人群下肢各关节对跑步经济性的贡献。前脚掌着地时,跑者的膝关节刚度高于踝关节;相反,足跟着地的跑者表现为膝关节刚度低于踝关节[2,22]。本研究结果显示受试者的膝关节刚度显著低于踝关节,说明本研究业余跑者惯用足跟着地跑步。足跟着地会造成膝关节在触地前期的屈曲角位移大于踝关节背屈角位移,从而使能量吸收从身体远端转移至近端,即通过屈曲膝关节贮存弹性能量[4,22]。此外,由于膝关节的屈曲角位移大于踝关节,故膝关节刚度是下肢刚度的主要影响因素[41]。由此可见,在以足跟着地的跑步中,膝关节负责主要的弹性能量贮存工作,更高的膝关节刚度有利于跑步经济性的提升。JIN 等[3]的研究发现跑步触地阶段踝关节刚度越高,其所做的功和产生的能量就越多,从而增加了跑步过程中的代谢能量消耗。因此,对于惯用足跟着地的业余跑者应关注于提升其膝关节刚度,从而获得更优的跑步经济性。

本研究的局限性在于膝和踝关节刚度受到足着地方式的影响,相对于业余跑者,高水平跑者的足着地方式可能倾向于中足或前脚掌着地[42],同时其膝和踝关节刚度均大于业余跑者[5]。因此,本研究结果仅适用于足跟着地的业余跑者,未来研究需要对高训练水平的跑者做进一步研究。此外,本研究无法确定关节肌肉力量与关节刚度之间的因果关系,后续研究需通过纵向干预验证关节肌肉力量对关节刚度的调控机制。

4 结　论

本研究发现,在业余跑者人群中,60°/s 和 180°/s 的膝关节屈肌等速肌力与膝关节刚度存在显著正相关性;60°/s 的踝关节背屈肌离心收缩等速肌力与踝关节刚度呈显著正相关关系;然而,膝关节伸肌和踝关节跖屈肌等速肌力与膝和踝关节刚度均不存在显著相关关系。结果提示,具备更强的膝关节屈肌和离心踝背屈肌力量的业余跑者在跑步过程中表现出更大的膝和踝关节刚度。在足跟着地方式下,膝关节刚度显著低于踝关节,提示膝关节在跑步弹性能的贮存和利用中发挥主要作用。因此,更强的膝关节屈肌力量可能通过提高膝关节刚度优化业余跑者的跑步经济性。此外,在进行等速肌力测试时,建议将等长收缩模式纳入跑者的力量评价体系,从而更全面地评价下肢关节肌肉力量对关节刚度的影响。

参考文献:

[1] STRUZIK A, KARAMANIDIS K, LORIMER A, et al. Application of leg, vertical, and joint stiffness in running performance: A literature overview[J]. Applied bionics and biomechanics, 2021, 2021: 9914278.

[2] 刘宇,魏勇. 运动科学领域的下肢刚度研究[J]. 上海体育学院学报,2008,32(5):31-35.
LIU Yu, WEI Yong. Research on lower limbs stiffness in field of sports science[J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2008, 32(5):31-35(in Chinese).

[3] JIN L, HAHN M E. Modulation of lower extremity joint stiffness, work and power at different walking and running speeds[J]. Human movement science, 2018, 58:1-9.

[4] KUITUNEN S, KOMI P V, KYRÖLÄINEN H. Knee and ankle joint stiffness in sprint running[J]. Medicine and science in sports and

exercise,2002,34(1):166-173.

[5] HOBARA H,KIMURA K,OMURO K,et al. Differences in lower extremity stiffness between endurance-trained athletes and untrained subjects[J]. Journal of science and medicine in sport,2010,13(1):106-111.

[6] KYRÖLÄINEN H,BELLI A,KOMI P V. Biomechanical factors affecting running economy[J]. Medicine and science in sports and exercise,2001,33(8):1330-1337.

[7] HAMNER S R,SETH A,DELP S L. Muscle contributions to propulsion and support during running[J]. Journal of biomechanics,2010,43(14):2709-2716.

[8] MONTE A,BALTZOPOULOS V,MAGANARIS C N,et al. Gastrocnemius medialis and vastus lateralis in vivo muscle-tendon behavior during running at increasing speeds[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports,2020,30(7):1163-1176.

[9] KOMI P V. Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics[J]. Journal of biomechanics,1990,23(S1):23-25,27-34.

[10] HOLZER D,EPRO G,MCCRUM C,et al. The role of muscle strength on tendon adaptability in old age[J]. European journal of applied physiology,2018,118(11):2269-2279.

[11] KUBO K,TABATA T,IKEBUKURO T,et al. Effects of mechanical properties of muscle and tendon on performance in long distance runners[J]. European journal of applied physiology,2010,110(3):507-514.

[12] 罗震,王俊清,张希妮,等. 跑步疲劳进程中下肢生物力学模式的非线性变化研究[J]. 中国体育科技,2021,57(3):29-36.
LUO Zhen,WANG Junqing,ZHANG Xini,et al. Nonlinear adaptations in lower extremity biomechanics during a fatiguing run[J]. China sport science and technology,2021,57(3):29-36(in Chinese).

[13] PAPPAS P,PARADISIS G,TSOLAKIS C,et al. Reliabilities of leg and vertical stiffness during treadmill running[J]. Sports biomechanics,2014,13(4):391-399.

[14] URBANCZYK C A,BONFIGLIO A,MCGREGOR A H,et al. Comparing optical and electromagnetic tracking systems to facilitate compatibility in sports kinematics data[J]. International biomechanics,2021,8(1):75-84.

[15] 陈严,郝卫亚,温煦,等. 简易力量测试法和等速肌力测试相关性研究[J]. 体育科学,2006,26(9):44-46.
CHEN Yan,HAO Weiya,WEN Xu,et al. Study on correlation between simple force measurement and isokinetic strength testing[J]. China sport science,2006,26(9):44-46(in Chinese).

[16] CHEN S Q,WANG D,ZHANG Q,et al. Relationship between isokinetic lower-limb joint strength,isometric time force characteristics,and leg-spring stiffness in recreational runners[J]. Frontiers in physiology,2021,12:797682.

[17] BESSER M P,KMIECZAK K,SCHWARTZ L,et al. Representation of temporal spatial gait parameters using means in adults without impairment[J]. Gait & posture,1999:113.

[18] 李玉,黄鹏,王宏,等. 健美操运动员优势侧与非优势侧膝关节等速肌力测试分析[J]. 中国组织工程研究,2021,25(2):232-236.
LI Yu,HUANG Peng,WANG Hong,et al. Dominant and non-dominant side knee isokinetic characteristics of Chinese calisthenics athletes[J]. Chinese journal of tissue engineering research,2021,25(2):232-236(in Chinese).

[19] 尚玢,曹峰锐,陈静. 男子水球守门员膝、踝关节屈伸肌群等速肌力实验测量[J]. 太原理工大学学报,2019,50(1):135-140.
SHANG Bin, CAO Fengrui, CHEN Jing. Assessing the muscle strength balance between flexors and extensors at knee and ankle in elite male water polo goalkeepers[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2019,50(1):135-140(in Chinese).

[20] 唐桥,张海忠. 综合性项目运动员动态平衡能力与双侧膝关节肌力、下肢爆发力的相关性研究[J]. 中国体育科技,2019,55(5):65-71.
TANG Qiao,ZHANG Haizhong. Research on the correlation of dynamic balance ability and bilateral knee joint strength and lower limb explosive force in comprehensive sport athletes[J]. China sport science and technology,2019,55(5):65-71(in Chinese).

[21] FU W J,FANG Y,GU Y D,et al. Shoe cushioning reduces impact and muscle activation during landings from unexpected,but not self-initiated,drops[J]. Journal of science and medicine in sport,2017,20(10):915-920.

[22] HAMILL J,GRUBER A H,DERRICK T R. Lower extremity joint stiffness characteristics during running with different footfall patterns[J]. European journal of sport science,2014,14(2):130-136.

[23] HOPKINS W G,MARSHALL S W,BATTERHAM A M,et al. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science[J]. Medicine and science in sports and exercise,2009,41(1):3-13.

[24] BENJAMINI Y,HOCHBERG Y. Controlling the false discovery rate:a practical and powerful approach to multiple testing[J]. Journal of the Royal Statistical Society:Series b (methodological),1995,57(1):289-300.

[25] GAZEAU F,KORALSZTEIN J P,BILLAT V. Biomechanical events in the time to exhaustion at maximum aerobic speed[J]. Archives of physiology and biochemistry,1997,105(6):583-590.

[26] HAYES P R,BOWEN S J,DAVIES E J. The relationships between

local muscular endurance and kinematic changes during a run to exhaustion at vVO2max[J]. Journal of strength and conditioning research,2004,18(4):898-903.

[27] 唐建倦,李康,莫清华. 跑步周期中腘绳肌的拉伤原因:肌电肌力数据分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2009,13(33):6513-6517.
TANG Jianjuan,LI Kang,MO Qinghua. Reason for hamstring strain in gait cycle:Electromyography and muscle strength analysis[J]. Journal of clinical rehabilitative tissue engineering research,2009,13(33):6513-6517(in Chinese).

[28] BROWN T N,FAIN A C,SEYMORE K D,et al. Sex and stride impact joint stiffness during loaded running[J]. Journal of applied biomechanics,2021,37(2):95-101.

[29] VERHEUL J,CLANSEY A C,LAKE M J. Adjustments with running speed reveal neuromuscular adaptations during landing associated with high mileage running training[J]. Journal of applied physiology,2017,122(3):653-665.

[30] LESKINEN A,HÄKKINEN K,VIRMAVIRTA M,et al. Comparison of running kinematics between elite and national-standard 1500 m runners[J]. Sports biomechanics,2009,8(1):1-9.

[31] GÓMEZ-MOLINA J,OGUETA-ALDAY A,STICKLEY C,et al. Differences in spatiotemporal parameters between trained runners and untrained participants[J]. Journal of strength and conditioning research,2017,31(8):2169-2175.

[32] HAGOOD S,SOLOMONOW M,BARATTA R,et al. The effect of joint velocity on the contribution of the antagonist musculature to knee stiffness and laxity[J]. The American journal of sports medicine,1990,18(2):182-187.

[33] MAHARAJ J N,CRESSWELL A G,LICHTWARK G A. Tibialis anterior tendinous tissue plays a key role in energy absorption during human walking[J]. Journal of experimental biology,2019,222(11):jeb191247.

[34] ALMEIDA M O,DAVIS I S,LOPES A D. Biomechanical differences of foot-strike patterns during running:A systematic review with meta-analysis[J]. The journal of orthopaedic and sports physical therapy,2015,45(10):738-755.

[35] RAITERI B J,CRESSWELL A G,LICHTWARK G A. Muscle-tendon length and force affect human tibialis anterior central aponeurosis stiffness in vivo[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2018,115(14):E3097-E3105.

[36] AAGAARD P,SIMONSEN E B,ANDERSEN J L,et al. Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction:Effects of resistance training[J]. Journal of applied physiology,2000,89(6):2249-2257.

[37] COLSON S S,MARTIN A,VAN HOECKE J. Effects of electromyostimulation versus voluntary isometric training on elbow flexor muscle strength[J]. Journal of electromyography and kinesiology,2009,19(5):e311-e319.

[38] TASI D,DIMOV D,GLIGORIJEVIC J,et al. Muscle fibre types and fibre morphometry in the tibialis posterior and anterior of the rat:A comparative study[J]. Series medicine and biology,2003,10(1):16-21.

[39] DUCHATEAU J,ENOKA R M. Neural control of lengthening contractions[J]. Journal of experimental biology,2016,219(Pt 2):197-204.

[40] ROBERTS T J. The integrated function of muscles and tendons during locomotion[J]. Comparative biochemistry and physiology part a:Molecular & integrative physiology,2002,133(4):1087-1099.

[41] BRUGHELLI M,CRONIN J. Influence of running velocity on vertical,leg and joint stiffness[J]. Sports medicine,2008,38(8):647-657.

[42] HASEGAWA H,YAMAUCHI T,KRAEMER W J. Foot strike patterns of runners at the 15 km point during an elite-level half marathon[J]. Journal of strength and conditioning research,2007,21(3):888-893.

（编辑 黄崇亚 张璐）